

# 基于规则的混联式混合动力系统控制策略

杜玖玉<sup>1,2</sup>, 王贺武<sup>1,2</sup>, 黄海燕<sup>1,2\*</sup>

(1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学中国车用能源中心, 北京 100084)

**摘要:** 为了进一步提高配备混联式液压混合动力的城市公交车的燃油经济性, 充分发挥液压混合动力系统高功率密度的优点, 该文提出了一种改进的基于规则的控制策略。通过在 Matlab/Simulink 环境中建立混合动力系统仿真模型, 研究基于规则的控制策略在城市客车用混联式液压混合动力系统的适应性、节油效果等。仿真结果表明: 采用改进的基于规则的控制策略, 配备混联式液压混合动力系统的城市客车可实现 23.4% 的节油率。

**关键词:** 车辆, 能量转化, 控制理论, 功率分流式混合动力系统, 双行星排, 运行工况

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.z1.026

中图分类号: TH137.3; S219.032.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-Supp.1-0152-06

杜玖玉, 王贺武, 黄海燕. 基于规则的混联式混合动力系统控制策略[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 152-157.  
Du Jiuyu, Wang Hewu, Huang Haiyan. Rule-based control strategy application on power-split hybrid powertrain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(Supp.1): 152-157. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

随着中国城市化进程加速和经济的快速发展, 汽车保有量不断快速攀升。对能源安全和城市环境带来了严峻的挑战<sup>[1]</sup>。为了减低能耗强度, 实现交通领域的排放目标, 迫切要求开发高效、低排放的汽车新型动力系统。而对于运行于城市拥堵工况下的公共服务领域车辆, 如公交车、环卫车辆等, 其运行特点是怠速比例高, 车辆启停频繁<sup>[2]</sup>。因此, 发动机的运行工况比较恶劣, 排放性能差, 能效低, 造成系统整体能耗高。由于此类车辆本身惯性比较大, 因此, 可供回收的制动能量大。如果有效回收制动能量, 将大幅提高车辆的燃油经济性。鉴于城市工况的运行特点, 制动能量回收是改善城市车辆燃油经济性的主要手段, 因此, 混合动力系统的功率能力是首要要求。在功率密度方面, 液压混合动力系统约为电混合动力系统近 10 倍, 另外, 液压元件和技术相对成熟, 成本低<sup>[3-5]</sup>。因此, 从技术和经济性角度综合考虑, 对于城市公交车, 液压混合动力系统是解决能耗大和排放问题的最佳技术路线选择<sup>[6-8]</sup>。纽约市政府已经投入 300 辆液压混合动力卡车示范运行, 动力系统来自伊顿和派克汉尼汾, 最高燃油经济性提升可达 25%<sup>[9]</sup>。

液压混合动力系统在机械结构参数确定的条件下, 其燃油经济性改善很大程度上由控制策略的优劣来决定<sup>[10-12]</sup>。Liu 等人研究了功率分流式混合动力系统的动力系统参数匹配、优化和系统控制, 提出一套对于混联式混合动力系

统通用的系统建模方法<sup>[13]</sup>。

本文在功率分流式液压混合动力系统上, 结合功率分流式混合动力系统能源管理的研究方法<sup>[14]</sup>, 研究应用基于规则的控制策略的适用性、控制效果等。

## 1 动力系统工作原理与控制策略分析

### 1.1 动力系统组成与工作原理

本文研究的动力系统是两段式液压混合动力系统, 其组成如图 1 所示。系统由行星排 K1、K2, 高压蓄能器, 液压元件 1, 液压元件 2, 同步器 S1、S2、S3、S4, 以及阀控机构等构成。其中行星排 K1、行星排 K2 分别是分流工况和功率循环工况的功率分流机构<sup>[15]</sup>。

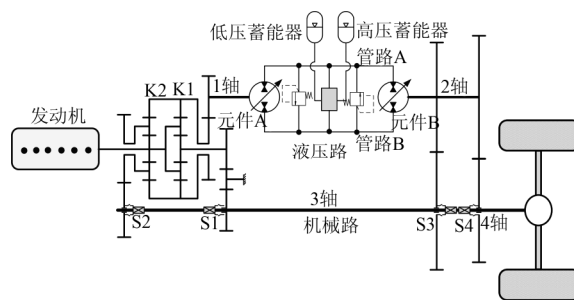


图 1 两段式混合动力系统组成简图  
Fig.1 Scheme of two-stage hydraulic hybrid powertrain

按照车辆行驶工况对车速比要求, 控制系统控制同步器选择不同的结合方式, 实现换挡, 满足车辆的行驶需求。系统要求速比低于参考速比时, 动力系统工作在第一段, 即同步器 S1 和 S3 结合, 同步器 S2 和 S4 分离; 系统要求速比高于参考速比时, 动力系统工作在第二段, 即同步器 S2 和 S4 结合, 同步器 S1 和 S3 分离。驱动工况, 发动机功率经分流机构分流, 一路流经液压路, 一路流经机械路, 经汇流机构汇流后驱动车辆。加速工况, 高压蓄能

收稿日期: 2011-11-01 修订日期: 2012-03-01

基金项目: 科技部国际科技合作计划资助课题 (2010DFA72760)

作者简介: 杜玖玉 (1976-), 女, 清华大学, 助理研究员, 博士。主要研究方向: 节能与新能源汽车技术, 汽车动力系统技术分析与评价, 清洁汽车全生命周期能效与排放性能分析。清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 100084。Email: dujiuyu@tsinghua.edu.cn

器释放储存的能量，提供辅助功率；减速或制动工况，液压元件以泵工况工作，将车辆动能转化为气体势能储存在高压蓄能器中，用于随后的驱动工况。车辆在启停频繁的工况下运行，储能元件不断回收制动能量，并提供辅助驱动功率，从而实现整车燃油经济性提升。

### 1.2 液压混合动力系统控制策略分析

混合动力系统的所有机构参数确定后，车辆的燃油经济主要取决于控制策略的优劣<sup>[6]</sup>。考虑到功率分流式液压混合动力传动综合了并联式液压混合动力传动和串联式液压混合动力传动的特点，其控制过程也包括了串联式系统和并联式系统的控制特征。对于液压混合动力系统，制约其性能优化的瓶颈主要是液压元件的转速限制和液压蓄能器能量密度限制，因而为了发挥其高功率密度优势，如何选择合适的控制策略显得尤为重要。

本文研究方案是具有双变量（液压元件 1 和液压元件 2）的多行星排构型混合动力系统，控制更为灵活，控制策略发挥的作用对系统性能影响更为显著。

开关控制（on-off）是电混合动力系统应用较多的一种能量管理控制方式，以优先回收制动能量，优先使用回馈能量为原则。该方法对于液压机械混合动力系统控制效果不好，原因是液压储能元件与电储能元件相比，其能量密度小的多，如采用开关控制，势必造成发动机频繁切换工况，瞬态工况增多，对燃油经济性和排放性能均造成负面影响，抵消了储能元件对发动机工作点优化的效果。

通过研究电混合动力传动中采用的能量管理控制策略和前人对其他液压混合动力传动形式的控制策略的探索研究<sup>[17]</sup>，认为基于规则（Rule-based）的控制策略是适合功率分流式液压混合动力传动的可行的控制策略。

### 1.3 基于规则的控制策略控制原理分析

基于规则的控制的工作机理是：事先凭理论分析和工程经验直觉设定一系列车辆预计工作状态值，将其工作区域划分<sup>[19]</sup>。根据设置的临界工作点值来判断车辆所工作的区域，从而采取相应的控制方式。其工作原理如图 2 所示。

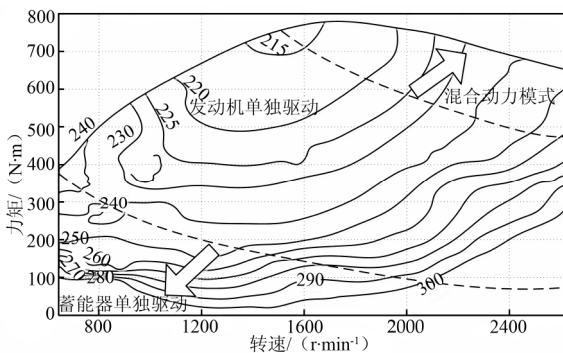


图 2 基于规则控制策略原理图  
Fig.2 Principle of rule-based control

由于蓄能器能量密度低，故在将基于规则的控制策略引入功率分流式液压混合动力传动控制中需进行改进，蓄能器其工作区域频繁充放能。改进后的基于规则的控制策略，减少发动机模式切换的频率，其控制原则是：首先在发动机万有特性图上，将发动机工作区域分为 3 部分

#### 1) 元件 2 单独驱动工作区域

当车速相对较低，车辆驱动功率需求较低，并且储能元件的蓄能状态处于较高值，则由液压元件 2 单独驱动车辆。蓄能器单独驱动区域取决于液压蓄能器的能量状态。由于液压储能元件的能量密度限制，该工况通常为车辆起步和发动机启动。

#### 2) 发动机单独工作区域

在车辆运行工况为稳定状态，比如匀速行驶，储能系统关闭，发动机单独驱动，系统以液压机械传动形式工作。

#### 3) 发动机和储能系统混合驱动

当车辆的驱动功率需求较高，并且储能元件的蓄能状态处于较低值，则发动机工作，提供驱动功率。液压元件 1 同时工作，辅助液压元件 2 驱动发动机。

随着车辆驱动功率需求进一步提高，由于负荷变化，发动机工作点偏出工作区域，该情况下，储能元件释放能量，增加液压元件 2 的驱动力矩，从而起到辅助驱动作用，从而保证发动机可工作在较高效率区间。

发动机停止工作区域包括蓄能器单独驱动和制动能量回收 2 个工况。在基于规则的控制策略下，可保证制动能量充分回收。其最大工作范围由蓄能器能量状态决定。基于规则的控制策略的基本原则如表 1 所示。

表 1 基于规则控制策略的基本原则

工况描述	$P_e$	$P_2$	$P_1$
$P_d < 0$ (再生制动)	0	$\max(P_d, P_{2\max})$	0
$P_d < P_{s\max}$ (蓄能器单独驱动)	0	$P_d$	0
$P_{s\max} < P_d < P_{e\max}$ (发动机驱动)	$P_d$	$P_d \delta_h$	$P_e - P_{me}$
$P_d > P_{e\max}$ (混合驱动)	$P_{e\max}$	$P_s + P_1$	$P_e - P_{me}$

注：表中， $P_e$  为发动机有效输出功率， $P_1$ 、 $P_2$  分别为液压元件 1、2 的输出功率， $P_{2\max}$  为液压元件 2 最大输出功率， $P_d$  为车辆驱动功率需求， $P_s$  为储能元件输出功率， $P_{s\max}$  为储能元件最大功率输出能力， $P_{e\max}$  为发动机最大有效输出功率， $P_{me}$  为机械路分流功率，kW； $\delta_h$  为液压路功率分流比，即液压路功率占总功率的比例； $\max(P_d, P_{2\max})$  表示  $P_d$ 、 $P_{2\max}$  两者之间的较大值。

## 2 车辆仿真运行工况分析

对于混合动力驱动车辆的燃油经济性研究以及系统控制优化等，通常是基于一定车辆运行工况  $v(t_i)$  进行的。世界范围内，现行的车辆能耗与排放测试行驶工况主要包括三大体系：美国行驶工况体系、欧洲行驶工况体系、日本行驶工况体系。其中，被广泛采用的包括美国的城市测功机工况（Urban Dynamometer Driving Schedule，简称 UDDS）、新欧洲工况（New European Driving Cycle，简称 NEDC）、日本 10-15 工况等<sup>[18]</sup>。同一种混合动力系统构型，在不同运行工况下，最优的控制策略不同，从而对应不同的系统燃油经济性。车辆的常运行工况是决定车辆燃油经济性的关键之一。

美国典型测试工况中的城市测功机工况，其特征为整体车速不高、加减速和怠速比例高、启停频繁（图 3 所示），比较符合中国城市车辆运行特征。因此，本文以城市测功机工况为车辆运行工况，研究混合动力系统对整车燃油经济性的改善。

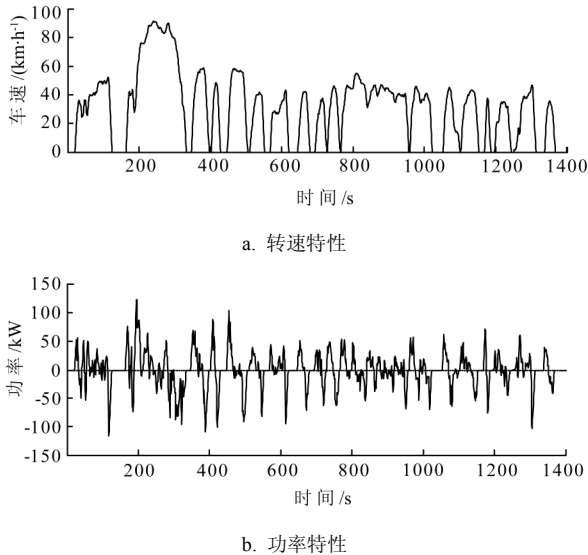


图3 城市测功机运行工况分析  
Fig.3 Characteristics of UDDS duty cycle

### 3 系统仿真分析

#### 3.1 系统模型

系统动态仿真在 Matlab/Simulink 环境进行, 系统采用逆向仿真的方法进行动态建模仿真<sup>[20]</sup>。以目标运行循环工

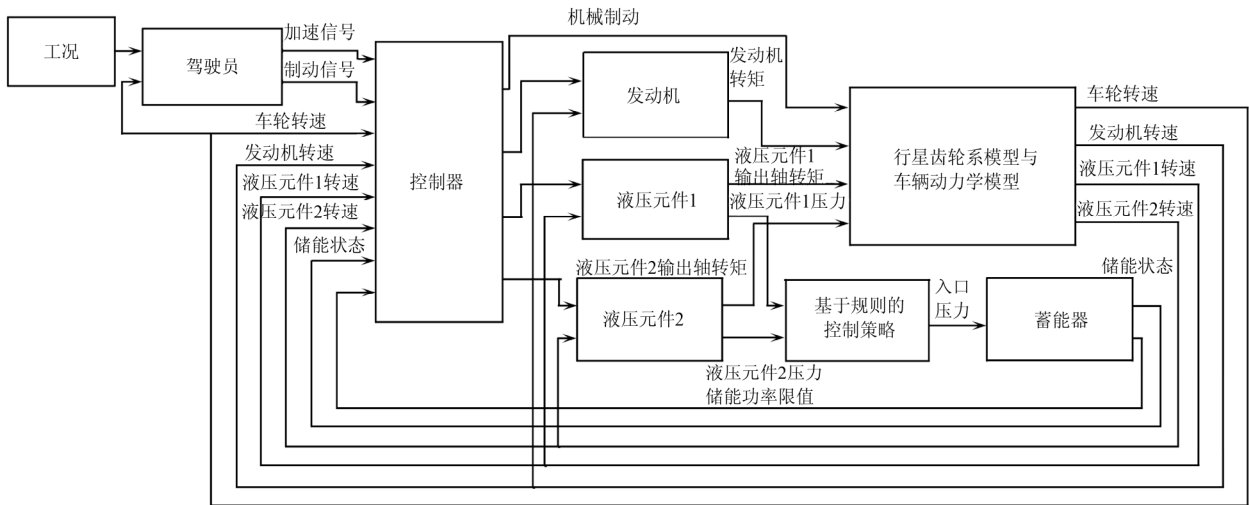


图5 系统仿真模型  
Fig.5 Simulation model of powertrain

#### 3.2 子系统模型

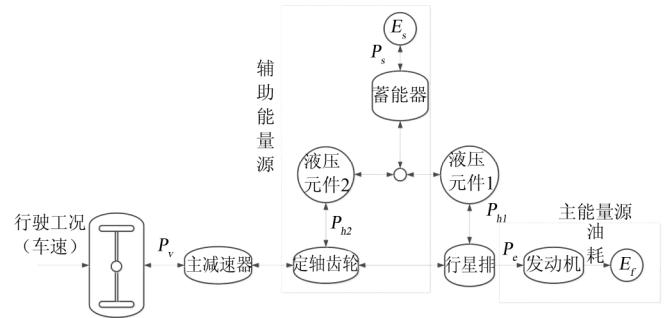
##### 1) 行星排模型

行星轮系可看作功率分流装置, 在任何一个构件被制动的情况下, 可看作一个功率比装置<sup>[22]</sup>, 采用杠杆分析研究系统的转速特性, 其模型为

$$\begin{cases} J_r \frac{d\omega_r}{dt} = FR - T_r \\ J_s \frac{d\omega_s}{dt} = FS - T_s \\ J_c \frac{d\omega_c}{dt} = T_c - FR - FS \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $T_r$ ,  $T_s$ ,  $T_c$  分别表示作用在太阳轮轴、齿圈轴和行

况作为系统输入, 输入到驾驶员模型, 驾驶员模型比较实际车速和目标参考车速, 做出加速或制动判断。驾驶员指令传到能量管理控制器, 能量管理控制器确定主能源和辅助能源分配比例。考虑行星排构件、定轴齿轮转动惯量影响。三个驱动元件: 发动机、液压元件 1 和液压元件 2 共同产生车辆驱动力矩。对混合动力系统建模采用自由体建模方法<sup>[21]</sup>, 建模原理如图 4 所示, 根据以上建模思想搭建系统仿真模型如图 5 所示。



注:  $P_s$  为蓄能器输入输出功率, kW;  $E_f$  为燃烧消耗的燃油的能量, kJ;  $P_v$  为车辆驱动功率需求, kW;  $P_{h1}$  为液压元件 1 输入输出功率,  $P_{h2}$  为液压元件 2 输入输出功率,  $P_e$  为发动机功率, kW。

图4 系统仿真原理图  
Fig.4 Schematic of system modeling conception

星架轴作用力矩, N·m;  $J_r$ ,  $J_s$ ,  $J_c$  为太阳轮、齿圈和行星架转动惯量,  $\text{kg/m}^2$ ;  $F$  为行星排构件内部作用力, N;  $R$  和  $S$  分别为齿圈和太阳轮直径, m;  $\frac{d\omega_s}{dt}$ ,  $\frac{d\omega_r}{dt}$ ,  $\frac{d\omega_c}{dt}$  分别为行星排的太阳轮、齿圈和行星架的旋转角减速度,  $\text{rad/s}^2$ 。

##### 2) 发动机数学模型

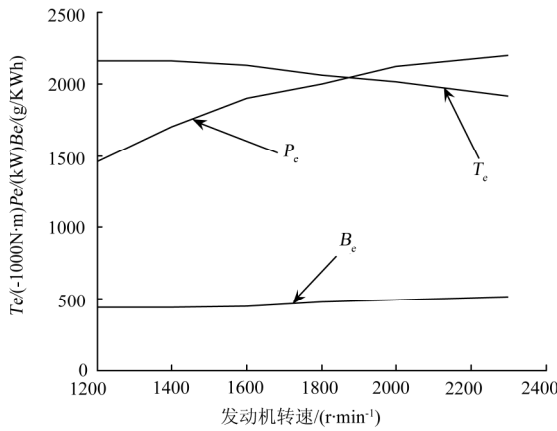
建立发动机性能、油耗数学模型, 便于分析功率分流式液压混合动力传动车辆燃油经济性和动力性。功率分流式液压混合动力传动车辆, 需要控制发动机使其工作点落在燃油经济性最佳区域。发动机数学模型是建立在汽车动力性和燃油经济性模拟计算基础上的, 数值计算的方法(主要是插值和拟合两种方法)来建立发动机的

模型<sup>[13]</sup>。忽略点火正时和喷油产生的发动机瞬态响应，近似认为发动机工况为一个较为恒定的平均水平，通过插值来计算发动机车辆运行过程中的油耗。通过实验室台架试验获得的发动机外特性等（图 6），从而得到发动机提供驱动能量  $E_e$  为

$$E_e = \int_i \left( \frac{T_e n_e}{9550} \right) dt \quad (T_e > 0) \quad (2)$$

式（2）中， $E_e$  为发动机有效输出能量，J； $T_e$  为发动机输出转矩，N·m； $n_e$  为发动机输出轴转速，r/min； $t$  为运行时间，s。

当发动机输出轴转矩  $T_e$  为正值时，发动机消耗燃油，提供车辆所需驱动转矩； $T_e$  为负值时，对应发动机反拖工况，即发动机制动。该工况下，系统没有燃油消耗。



注： $B_e$  为发动机的比油耗，g/kWh； $T_e$  为发动机输出轴转矩，N·m； $P_e$  为发动机输出功率，kW。

图 6 发动机特性曲线  
Fig.6 Performance curve of diesel engine

### 3) 车辆动态模型

车辆行驶阻力方程为<sup>[23]</sup>

$$F_L = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (3)$$

式（3）中， $F_L$  为路面负荷，N； $F_f$  为车辆滚动阻力， $F_f = fmg \cos \alpha$ ，N； $f$  为车辆滚动阻力系数， $f = 0.0076 + 0.000056u_a$ ； $u_a$  为车辆行驶速度，km/h； $m$  为汽车整备质量，kg； $\alpha$  为道路坡度角，弧度； $g$  为重力加速度， $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ； $F_w$  为风阻， $F_w = \frac{C_D A u_a^2}{21.15}$ ，N； $C_D$  为空气阻力系数； $A$  为迎风面积， $\text{m}^2$ ； $F_i$  为坡道阻力， $F_i = mgs \sin \alpha$ ，N； $F_j$  为加速阻力， $F_j = (m + \Delta m) \frac{d\omega_w}{dt} r$ ，N； $\Delta m$  为车辆转动部分构件的等效平动质量，主要与飞轮的转动惯量、车轮的转动惯量以及传动系统的传动比有关，

$$\Delta m = \frac{\sum J_w}{r^2} + \frac{J_f i_g^2 \eta_T}{r^2}, \text{ kg}; \quad \frac{d\omega_w}{dt} \text{ 为车轮角加速度, rad/s}^2;$$

$r$  为车轮半径，m； $J_f$  为飞轮转动惯量， $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ； $J_w$  为车轮转动惯量， $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ； $i_0$  为主减速器的速比， $i_g$  为变速器的速比； $\eta_T$  为传动系统传动效率。

### 4) 液压系统模型

建立液压系统的模型，液压元件的模型参考经典 Wilson 模型<sup>[24-27]</sup>。液压管路 A 的压力为

$$\frac{dp_A}{dt} = \frac{1}{C_{HP} + C_A} (q_1 + q_2) \quad (4)$$

管路 B 中的压力为

$$\frac{dp_B}{dt} = \frac{1}{C_{LP} + C_B} (q_1 + q_2) \quad (5)$$

高压蓄能器储能方程为

$$E_s = \int_i (q_s p_h) dt \quad (6)$$

包含液压储能元件的液压路，根据其流量平衡关系为

$$q_1 - q_2 = -m_g \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

液压元件工作压差  $\Delta P$  为

$$\Delta p = p_H - p_L + \text{sgn}(\theta) \Delta p_L \quad (8)$$

动力系统的能量再利用效率  $\eta_u$  为

$$\eta_u = \left( \frac{v_{r\_max}}{v_{b\_max}} \right)^2 \quad (9)$$

式（4-9）中， $E_s$  为液压蓄能器储存的能量，J； $q_s$  为高压蓄能器液压油流量， $q_s = \frac{dV_{oil}}{dt}$ ，L/min； $\frac{dV_{oil}}{dt}$  为单

位时间流经蓄能器阀口的液压油容积，L； $p_h$  为高压蓄能器中高压油油压，Pa； $C_{HP}$  为高压蓄能器的液容， $C_A$  为液压元件与液压蓄能器进油口之间的液压管路 A 的液容， $\text{m}^5/\text{N}$ ； $C_{LP}$  为低压蓄能器的液容， $C_B$  为液压元件与液压蓄能器进油口之间的液压管路 B 的液容， $\text{m}^5/\text{N}$ ； $q_1$ 、 $q_2$  分别为液压元件 1、2 的流量，L/min； $\theta$  为液压元件旋转角，弧度； $\text{sgn}(\theta)$  为符号函数， $\text{sgn}(\theta) = 1$  表示液压元件以泵模式工作， $\text{sgn}(\theta) = -1$  表示液压元件以马达模式工作； $V$  为管路中液压油容积，L； $p_H$ 、 $p_L$  分别为高压管路和低压管路压力，Pa； $\Delta p_L$  为低压蓄能器入口压差，Pa； $v_{r\_max}$  为再生制动能量使车辆获得的最高车速， $v_{b\_max}$  为车辆制动初始车速，m/s。

### 3.3 仿真结果分析

采用改进的基于规则的控制策略基于美国测功机工况进行仿真分析，制动能量回收特性如图 7 所示。

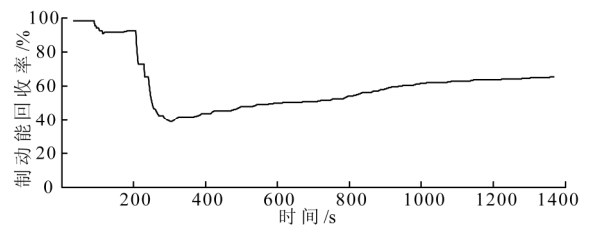
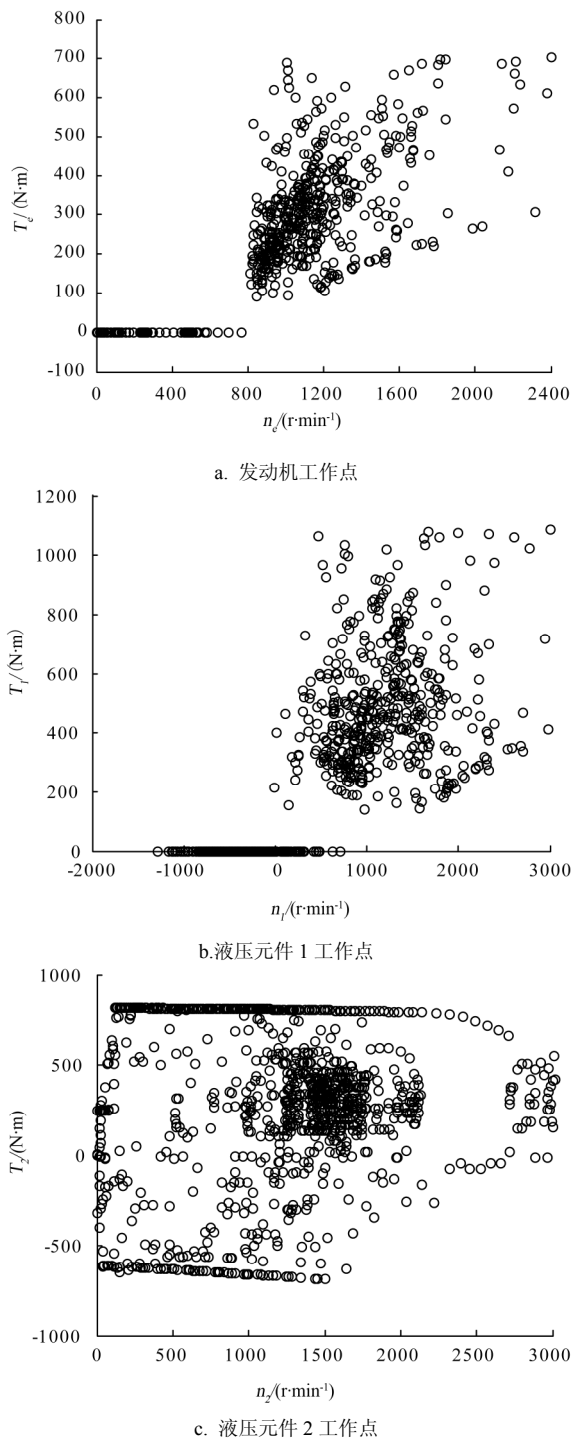


图 7 制动能量回收率  
Fig.7 Recover ratio of brake energy

可看出，混合动力系统的制动能量回收率最高可达到 63%。基于规则的控制方法是按照蓄能器储能状态决定，

并由液压元件 2 工作能力限制来划分工作区域，制动工况落在发动机不工作区。在同样结构参数条件下，基于规则的控制方法可使混合动力系统制动能量回收最大化。由于基于规则控制方法是从发动机工作点优化角度出发的一种控制方法，从图 8a 中可以看出发动机的工作点分布主要分布于高效率区域。由于受本身能量密度低的限制，液压元件 1 和 2 部分工况效率较低（图 8b、8c）。



注： $T_1$ 、 $T_2$  分别为液压元件 1、2 输出转矩，N·m； $n_1$ 、 $n_2$  分别为液压元件 1、2 转速，r/min。

图 8 主要部件工作点分布

Fig.8 Main components working region with RB strategy

在 400 s 附近区间由于蓄能器最大储能能力限制，起

动车辆传统摩擦制动，制动能量回收率低于 50%。将节油率作为控制策略效果的考量值，节油率定义为液压混合动力系统较同级别液压机械传动的车型的燃油节省量与相同条件下液压机械车辆的燃油消耗的比值。

图 9 为基于规则的控制策略下功率分流式液压混合动力传动车辆与液压机械传动车辆发动机能量消耗比较。从图 10 可看出，在 UDDS 循环工况下，如采用改进的基于规则控制策略的分流式液压混合动力系统的车辆的节油效果显著。最高节油率可达 40%，工况平均节油了可达 23.2%。

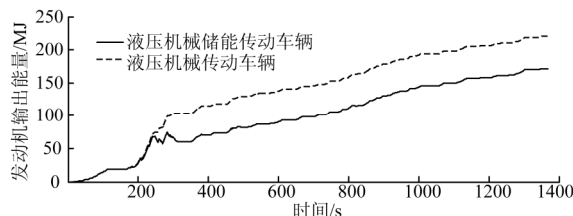


图 9 发动机有效能量输出需求比较

Fig.9 Comparison of engine effective energy output between HMT and HHP with Rule-based control

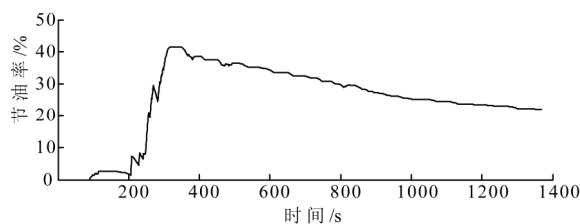


图 10 基于 UDDS 运行工况的系统节油率

Fig.10 Fuel saving ratio based on UDDS duty cycle

#### 4 结论与讨论

1) 改进的基于规则的控制策略，在美国城市测功机工况下使车辆平均燃油经济性提升 23.2%，满足设计中度及以上混合动力系统的燃油经济性目标。

2) 在基于规则控制策略下，受能量密度限制，液压元件 2 的工作区存在较大低效率区间，抵消了部分燃油经济性改善效果。

3) 基于规则的控制策略较容易实施，但由于其静态控制特性，使得与实际工况适应性降低，在实际工况与预设工况差异较大情况下，对系统的燃油经济性贡献率显著降低。要提升基于规则的控制策略的有效性，必须对设定的门限值进行优化。

下一步研究工作要对控制策略进行优化，并搭建台架试验台，通过硬件在环仿真对控制策略的有效性进行验证，并进一步优化控制参数。

#### [参 考 文 献]

[1] 中国广播网. 中国汽车销量破 1700 万高速增长威胁能源安全 [EB/OL]. <http://finance.eastday.com/economic/m1/20101128/u1a5576784.html>, 2010-11-28/2011-12-02.

[2] 北京市科学技术委员会. 城市客车多能源一体化混合动力系统及系列化车型应用[EB/OL]. [http://www.bjkw.gov.cn/HTSC\\_WEB/xmjswj](http://www.bjkw.gov.cn/HTSC_WEB/xmjswj), 2010-12-01/2011-12-02. /121.

- chengshikeche/chengshikeche-index.html
- [3] 中国工程机械品牌网.油混合与油液混合谁更胜一筹? [EB/OL]. <http://news.hexun.com/2011-04-22/128963041.html>, 2011-04-22/2011-12-02.
- [4] Buchwald P., Christensen G., H. Larsen P. Improvement of Citybus Fuel Economy Using a Hydraulic Hybrid Propulsion system -A Theoretical and Experimental Study[R]. Warrendale, PA, USA: SAE Paper 790305, 1979.
- [5] Mohamed Saber Ahmed Ibrahim. Investigation of Hydraulic Transmissions for Passenger Cars[D]. RWTH Aachen University, 2011.
- [6] 盖世汽车网. 商用车伊顿混合动力系统累计行驶达 2 亿英里 [EB/OL]. <http://auto.qq.com/a/20111118/000172.htm>, 2011-11-18/2011-12-02.
- [7] Bohlmann B. Hydraulic Hybrids for refuse truck[R]. Eaton hybrid power, 2008.
- [8] Jeff Alson, dan Barba J B. Progress Report on Clean and Efficient Automotive Technologies Under Development at EPA[R]. Advanced Technology Division Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency, 2004.
- [9] Fleets & Fuels. 300 Hydraulic Hybrids for New York City[EB/OL]. [http://www.fleetsandfuels.com/sampleFF/issues/Fleets-Fuels3January2011\\_.pdf](http://www.fleetsandfuels.com/sampleFF/issues/Fleets-Fuels3January2011_.pdf), 2011-1-3/2011-12-02.
- [10] Lin C. Modeling and control strategy development for hybrid vehicles[D]. The University of Michigan, 2004.
- [11] Kai Loon Cheong, Perry Y. Li and Thomas R. Chase. Optimal Design of Power-Split Transmissions for Hydraulic Hybrid Passenger Vehicles[C]. 2011 American Control Conference. O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA, 2011.
- [12] Kepner R P. Hydraulic Power Assist-A Demonstration of Hydraulic Hybrid Vehicle Regenerative Braking in a Road Vehicle Application[R]. Warrendale, PA: SAE Paper 2002-01-3128, 2002.
- [13] Jinming Liu. Modeling, Configuration and Control Optimization of Power-split Hybrid Vehicles[D]. University of Michigan, 2007.
- [14] Kliuzovich S. Analysis of control systems for vehicle hybrid power trains[J]. Transport. 2007, 22(2): 105—110.
- [15] 杜玖玉. 车辆液压机械储能传动技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2009.
- [16] Kukhyun Ahn1, Sungtae Cho S W C. Optimal operation of the power-split hybrid electric vehicle powertrain[J]. Proc. IMechE J. Automobile Engineering. 2008, 222(D): 789—800.
- [17] Syed, F.u, Hao Yin M K, Okubo, S,smith M. Rule-Based Fuzzy Gain-Scheduling PI Controller to Improve Engine Speed and Power Behavior in a Power-split Hybrid Electric Vehicle[C]. 2006.
- [18] 陈全世, 朱家琰, 田光宇. 先进电动汽车技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.
- [19] Hofman T. Framework for Combined Control and Design Optimization of Hybrid Vehicle Propulsion Systems[D]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2007.
- [20] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [21] Chan-Chiao Lin. Modeling and Control Strategy Development For Hybrid Vehicles[D]. The University of Michigan, 2004.
- [22] 王志新, 王军. Prius 功率分配机构的杠杆模拟方法[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2004, 18(4): 15—17.
- [23] 余志声. 汽车理论(第 5 版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [24] 汪功明. 液压与气压传动[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [25] 王会议. 静液储能传动系统节能机理及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1996.
- [26] 姚怀新. 工程车辆液压力学与控制原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [27] 张庆永, 常思勤. 液驱混合动力车辆液压系统建模及仿真[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2008, 32(6): 701—706.

## Rule-based control strategy application on power-split hybrid powertrain

Du Jiuyu<sup>1,2</sup>, Wang Hewu<sup>1,2</sup>, Huang Haiyan<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Automotive Energy Research Center (CAERC), Beijing 100084, China )

**Abstract:** Targeting to further improve the fuel economy of the city bus with power-split hydraulic hybrid powertrain operating under urban cycle, and take advantage the high power density of hydraulic hybrid fully, a kind of improved rule-based control strategy was proposed. Mathematic model was setup in Matlab/Simulink to investigate adaptive ability, effectiveness of rule-based control strategy was applied on the city bus with designed hybrid powertrain. The simulation results showed: with proposed hybrid powertrain, adopting power management of rule-based method, 23.4% improvement on fuel economy can be achieved.

**Key words:** vehicle, energy transfer, control theory, power split hybrid powertrain, dual planetary, driving cycle